

SIMULAÇÃO DE UM MOTOR ELÉTRICO EM QUE O ESTATOR FOI SUBSTITUÍDO POR MATERIAIS PRODUZIDOS COM PROCESSO DE METALURGIA DO PÓ

ESIMULATION OF AN ELECTRIC MOTOR IN THE STATOR WAS REPLACED BY PRODUCED MATERIALS WITH PROCESS OF POWDER METALLURGY

Rafael Francisco Niada¹

Moisés de Matos Dias²

Ricardo Martins de Martins³

Patrice Monteiro de Aquim⁴

Lírio Schaeffer⁵

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo a simulação de um motor síncrono trifásico, no programa computacional de elementos finitos (FEMM). O núcleo do estator, usualmente construído com chapas laminadas, foi substituído por materiais produzidos a partir do processo de Metalurgia do Pó (M/P). Confeccionaram-se corpos de prova de ferro puro, Fe-P, Fe-Si e Fe-Ni, todos sinterizados. Foram analisadas as grandezas magnéticas: curvas de histerese, resistividade elétrica. Com os dados obtidos, realizaram-se simulações computacionais de funcionamento para observar o fluxo de entreferro e torque, onde foi feita a comparação entre os motores com núcleo sinterizado e o motor com núcleo do estator de chapas.

Palavras-chave: Materiais magnéticos macios. Metalurgia do pó, núcleo de máquinas elétricas. Simulação computacionais por elementos finitos. Motor elétrico.

ABSTRACT

This study aimed to simulate a three-phase synchronous motor, in computing finite element (FEMM). The stator core usually constructed of rolled sheets, was replaced by material produced from the powder metallurgy process (P / M). They crafted to pure iron specimens, Fe-P, Fe-Si and Fe-Ni, all sintered. The magnetic quantities were analyzed: hysteresis curves, electrical resistivity. With the data obtained, computer simulations were carried out to observe the operating air-gap flux and torque, where the comparison between engines sintered core and the core motor with stator plates could be made.

Keywords: Soft magnetic materials. Powder metallurgy. Core electrical machines. Computational simulation finite element. Electric motor.

¹ rafael.niada@ig.com.br

² moisesdias@feevale.br

³ ricardomartins@feevale.br

⁴ patrice@feevale.br

⁵ schaefer@ufrgs.br

1 INTRODUÇÃO

A conversão eletromecânica de energia envolve a troca de energia entre um sistema elétrico e um mecânico. O processo é reversível, exceto por uma pequena quantidade de energia que se perde por aquecimento. Quando a conversão é elétrica para mecânica, o dispositivo é chamado de motor e de gerador quando a energia mecânica é convertida em elétrica (DEL TORO, 1994).

As máquinas elétricas são constituídas por circuitos elétricos e magnéticos acoplados entre si. O circuito magnético é o caminho para o fluxo magnético, assim como um circuito elétrico estabelece um caminho para a corrente elétrica. Nas máquinas elétricas, os condutores percorridos por correntes interagem com os campos magnéticos resultando na conversão eletromecânica de energia (NASAR, 1987).

O motor de corrente contínua (CC), é aquele cuja corrente possui fluxo contínuo e ordenado de elétrons, sempre na mesma direção, e o motor de corrente alternada (CA), é aquele em que a magnitude e a direção da corrente variam ciclicamente. Ou seja, há variação de corrente elétrica, ao contrário da corrente contínua (SMITH, 1998).

Os motores com ímã permanente de corrente contínua sem escova (MIP) se destacam por serem mais eficientes energeticamente do que outras máquinas elétricas. Os ímãs permanentes alojados no rotor geram uma onda magnética de forma trapezoidal, na força contra eletromotriz. O controle de rotação é mais simples em comparação a outros motores (SIQUEIRA; ANDRADE, 2008). A construção desses motores, foi impulsionada pela fabricação de ímãs permanentes de alto poder energético, baseados em terras raras, como o neodímio-ferro-boro (Nd-Fe-B) ou o samário-cobalto (Sm-Co), que não são desmagnetizados com facilidade, quando submetidos a elevadas correntes; e também com o desenvolvimento de componentes eletrônicos, que permitiu um maior controle de velocidade e acionamento (JAHNS et al., 2009).

Os MIP são utilizados na indústria de eletrodomésticos, automotiva, aeroespacial, medicina, automação industrial e Instrumentação. Eles possuem vantagens sobre motores com escovas CC e motores de indução, tais como:

- melhor velocidade versus características de torque;
- alta resposta dinâmica;
- alta eficiência;
- longa vida útil;
- operação silenciosa;
- gamas de velocidade mais elevada;
- razão entre o torque entregue e tamanho do motor é mais elevado.

Essas vantagens o tornam útil para aplicações onde o espaço e o peso são fatores críticos (YEDAMALE, 2003).

Com os processos da Metalurgia do Pó (M/P) é possível construir os núcleos em blocos maciços únicos, com elevada permeabilidade magnética (característicos dos aços magnéticos) e alta resistividade elétrica (JANSSON, 1992; KRAUSE et al., 1997). Ao se construir motores elétricos com

essas características, menos etapas estarão presentes no processo de produção e menos energia será consumida, no entanto, os motores elétricos convencionais com núcleos de chapas laminadas, normalmente apresentam rendimento significativamente maior, se comparado a motores elétricos com núcleos maciços, mesmo aqueles obtidos a partir dos processos da metalurgia do pó.

A aplicação da metalurgia do pó em núcleos de máquinas elétricas fica restrita a motores elétricos especiais onde o rendimento não é o critério mais importante, ou em alguns servo motores onde os enrolamentos de armadura são alimentados com corrente elétrica de frequência elevada. Outra aplicação é em geradores com ímãs permanentes com grande quantidade de pólos. Nesse caso, apesar das correntes elétricas envolvidas serem de alta frequência, o giro do rotor pode ocorrer em baixas frequências, uma vez que, velocidade angular de giro de um rotor e frequência da corrente é proporcional, porém esta relação depende também do número de pólos da máquina. Acima de 400 Hz, os núcleos magnéticos obtidos a partir dos processos da metalurgia do pó, apresentam rendimento similar aos núcleos de chapas laminadas, podendo atingir desempenho superiores (JANSSON, 1992; KRAUSE et al., 1997).

Assim este trabalho tem por objetivo mostrar, com a utilização de programa de simulações computacionais, que é possível a utilização de compósitos magnéticos produzidos a partir de processos de metalurgia do Pó, na construção de núcleos de motores elétricos.

2 CARACTERÍSTICA DE MOTORES ELÉTRICOS PRODUZIDOS COM PROCESSO DA METALURGIA DO PÓ

2.1 PROCESSOS DA METALURGIA DO PÓ EM MOTORES ELÉTRICOS

Em alguns tipos de motores elétricos os núcleos do rotor e estator são obtidos a partir de pós metálicos, utilizando-se os processos da Metalurgia do Pó (Figura 1). A M/P é um processo relativamente recente da metalurgia de transformação, onde as peças são obtidas a partir dos pós constituintes. Os processos básicos da M/P são (GERMAN, 1984; MORO, AURAS, 2007):

- obtenção dos pós: Existem vários processos para obtenção de pó metálico, sendo que sua escolha depende do conjunto de propriedades do material e das características que se quer para o pó, em função da aplicação pretendida;
- mistura: A mistura tem como objetivo assegurar a uniformidade das peças e produzi-las com uma boa dispersão dos constituintes, garantindo dessa forma, sua homogeneidade;
- compactação: A compactação é feita por prensas e gera uma peça com formato final ou aproximado à peça a ser fabricada, chamada de compactado verde. É muito frágil, e o manuseio inadequado pode “esfarelar” a peça;
- sinterização: Os compactados verdes são submetidos ao processo de sinterização em fornos com temperaturas controladas, próximas ao ponto de fusão dos materiais, para que ocorram as ligações entre os pós pré-ligados, conferindo as propriedades mecânicas requeridas.

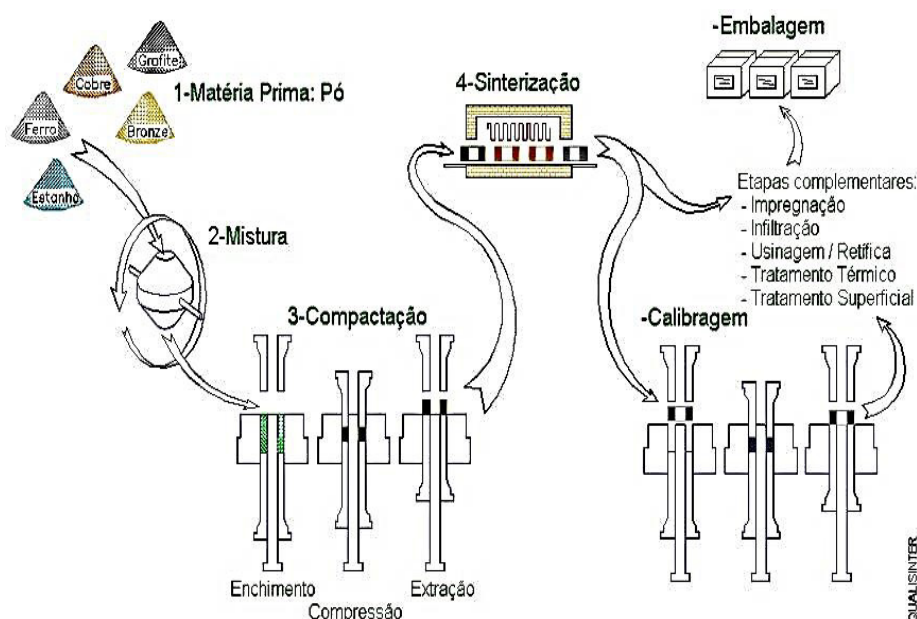


Figura 1 – Representação esquemática das etapas do processo de M/P (MORO, AURAS, 2007).

Às vezes é necessária uma quinta etapa como a calibragem. A M/P propicia a mistura de pós com diferente natureza química, desde que os pós sejam misturados homogeneamente (GERMAN, 1984; MORO; AURAS, 2007).

2.2 PROPRIEDADES FÍSICAS DE INTERESSE DE MATERIAIS PARA NÚCLEOS DE MOTORES ELÉTRICOS

As propriedades físicas de interesse dos materiais utilizados no processo de fabricação de núcleos de máquinas elétricas estão relacionadas a seguir:

- Propriedades Magnéticas
- Resistividade Elétrica
- Propriedades Mecânicas (Dureza e Ductilidade)

As propriedades magnéticas são obtidas a partir da curva de histerese (Figura 2), que relaciona campo magnético **H** aplicado a um material, com a indução magnética **B** resultante. Para os materiais magnéticos duros ou ímãs permanentes, a relação **BxH** tem as características mostradas na Figura 2 - (a). Os materiais magnéticos macios como os aços magnéticos, possuem um ciclo mais estreito com baixa coercitividade. A Figura 2 - (b) mostra gráficos comparativos entre estes dois tipos de materiais, macio que se magnetiza facilmente e duro com menor permeabilidade magnética (JILES, 1991; KRAUS; CARVER, 1978).

O ponto em que a curva corta o eixo de **B**, no quadrante superior esquerdo, é denominado de magnetismo remanente ou retentividade **B_r**, e representa a indução magnética residual que permanece no material sem campo magnético aplicado ($H = 0$). No sistema CGS de unidades (mais utilizados para caracterização de materiais magnéticos), **B** é dado em Gauss [G]. O ponto em que a curva corta o

eixo de H no mesmo quadrante é denominado de força coercitiva ou coercitividade H_c e representa o campo magnético necessário para desmagnetizar completamente o material ($B = 0$). No sistema CGS H tem como unidade o Oersted [Oe] (JILES, 1991; KRAUS; CARVER, 1978).

A permeabilidade magnética relativa μ_r está relacionada com o ponto de maior declividade da curva de histerese. A indução de saturação B_{\max} pode ser visualizada a partir dos valores de campo onde a indução tende a permanecer constante ou com declividade quase nula. Uma curva típica de um material magnético é mostrada pela curva sólida da Figura 2 - (a). Para fins de comparação, a Figura 2- (c) mostra quatro linhas tracejadas, correspondendo às permeabilidades relativas constantes de $\mu_r = 1$, $\mu_r = 10$, $\mu_r = 100$ e $\mu_r = 1000$ (JILES, 1991; KRAUS; CARVER, 1978).

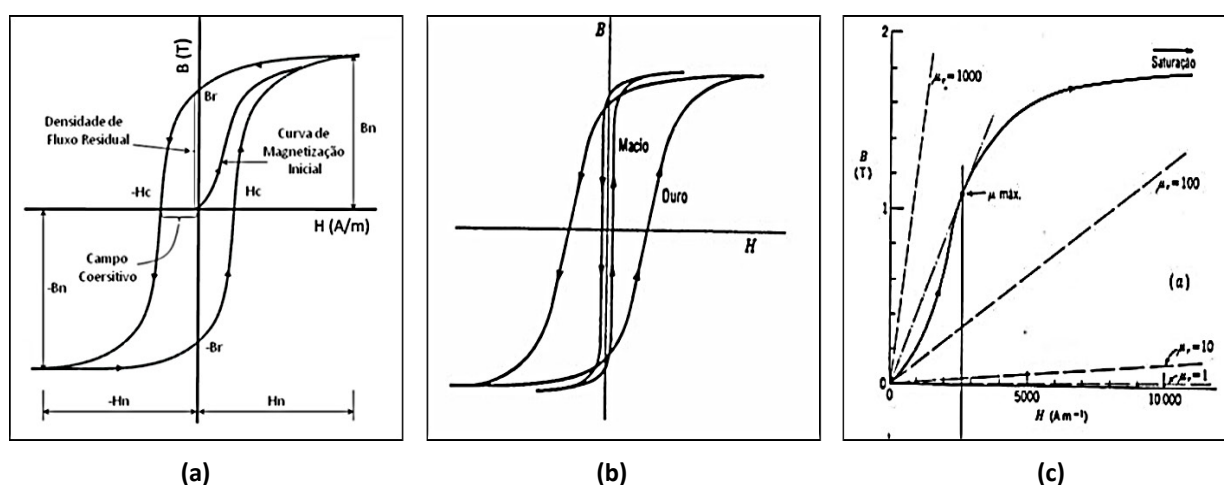


Figura 2 - Ciclo de histerese – (a) para um material magnético duro, (b) comparação entre material magnético macio e duro, (c) curva de magnetização (KRAUS; CARVER, 1978).

A resistividade elétrica deve possuir o maior valor possível, para minimizar o efeito das correntes parasitas. Sempre que há a incidência de um fluxo alternado sobre um núcleo magnético, haverá também correntes induzidas (correntes parasitas ou de *Foucault*). O estator e o rotor são construídos com chapas laminadas e isoladas, para diminuição da área de circulação e restrição das perdas por correntes parasitas e nos núcleos maciço são consideravelmente maiores. Quanto menor a espessura das chapas, maior potência nesses núcleos. A redução das correntes induzidas, também é obtida a partir do aumento resistividade elétrica, uma vez que, resistividade e corrente elétrica, são grandezas físicas inversamente proporcionais. Motores elétricos de alto rendimento são construídos com chapas de aço silício, que possui resistividade elétrica maior que o aço baixo carbono (NASAR, 1987; FITZGERALD et al., 2003).

O material utilizado na construção dos núcleos do estator e do rotor de motores elétricos, devem apresentar as seguintes propriedades:

- elevada Permeabilidade Magnética Relativa;
- baixa Coercitividade Magnética;
- elevada Resistividade Elétrica;
- elevada Indução de Saturação.

2.3 FATORES QUE INFLUENCIAM NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DE MATERIAIS SINTERIZADOS

As propriedades físicas, magnéticas e elétricas, dos materiais obtidos por M/P são influenciadas por vários fatores. Os considerados de maior importância no desenvolvimento desse trabalho estão relacionados a seguir:

- a resistividade de um material metálico aumenta quando são adicionadas impurezas como o Si, P ou Ni, pois elas provocam distorções no reticulado cristalino. Quanto maior as imperfeições da rede cristalina, maior a resistividade. (LUBORSKY et al., 1996);
- a adição de silício ao ferro, além de aumentar a resistividade elétrica, aumenta a permeabilidade magnética relativa máxima, diminui a coercitividade e também diminui a indução de saturação (LALL; BAUM, 1998);
- os materiais obtidos por M/P possui resistividade elétrica maior do que materiais maciços de mesma composição química, devido principalmente à porosidade e a oxidação superficial das partículas (LALL, 1992). Com o aumento da porosidade, há uma diminuição da permeabilidade magnética, uma diminuição da indução de saturação e um aumento da coercitividade (JAMES; WILLIAMS, 1979);
- a resistividade elétrica das ligas metálicas, também é influenciada pelo tamanho de grão. Quanto menor o tamanho de grão, maior a quantidade de contornos, que também provocam distúrbios na rede cristalina, aumentando a resistividade. Entretanto, a diminuição do tamanho de grão causa um decréscimo da permeabilidade magnética e um aumento da coercitividade (LANDGRAF; PLAUT, 1989);
- o aumento da granulometria do pó aumenta a permeabilidade magnética, mas aumenta também a coercitividade (LANDGRAF; PLAUT, 1989). Além disso, outros fatores como tempo, temperatura e atmosfera de sinterização alteram algumas propriedades físicas (LALL, 1992);
- impurezas como carbono, nitrogênio e oxigênio afetam as propriedades magnéticas das ligas de ferro sinterizadas. Quando o objetivo é a obtenção de materiais magnéticos de boas propriedades, é conveniente que os percentuais destas impurezas sejam mantidos nos seguintes níveis (LALL, BAUM, 1998):
 - Carbono: 0,01% máximo;
 - Oxigênio: 0,02% máximo;
 - Nitrogênio: 0,01% máximo;

Os materiais sinterizados mais comumente utilizados são os seguintes (LALL; BAUM, 1998; LENEL, 1984; BAS et al., 1988).

- ferro puro;
- ligas ferro-cobalto;
- ligas ferro-fósforo;
- ligas ferro-silício.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 COMPOSIÇÃO DAS LIGAS ESTUDADAS

O estudo foi realizado a partir de ligas sinterizadas, obtidas a partir de pós de ferro misturado ao fósforo, silício e níquel, adquiridos da Höganäs Brasil Ltda. Conforme certificado do fabricante, o pó de ferro utilizado foi o ASC100.29, com 99,4% da granulometria entre 45 μm e 150 μm . O pó Fe₃P (84% de Fe, 16% de P) apresenta 90% de sua dimensão abaixo de 14,58 μm . O pó FeSi 45 (55% de Fe e 45% de Si) tem 87% de seu conteúdo entre 45 μm e 250 μm e o pó de níquel apresenta granulometria mínima de 3 μm e máxima de 7 μm . O pó de ferro foi misturado em percentuais mássicos com fósforo (1%, 2% e 3%), silício (1% e 3%) e níquel (50%) em um misturador duplo cone, com rotação de 60 rpm durante 20 minutos, para dispersão dos constituintes. Foi adicionado a mistura, 1% de lubrificante sólido a base de estearato de zinco.

3.2 OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Para construção dos corpos de prova em forma de anel toroidal (anel de *Rowland*), a liga já misturada, é disposta na cavidade da matriz, mostrada na Figura 3- (a). A compactação ocorre com a utilização de uma prensa hidráulica, por deslocamentos simultâneos dos punções superiores e inferiores à temperatura ambiente. De acordo com GERMAN (1984), é necessária uma pressão de $6,0 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ para obter uma massa específica média do compactado, a área da secção transversal do corpo de prova é $5,81 \times 10^{-4} \text{ m}^2$. A Figura 3 - (b) mostra a matriz utilizada para compactação dos anéis, e a Figura 3 -(c) mostra o corpo de prova obtido.

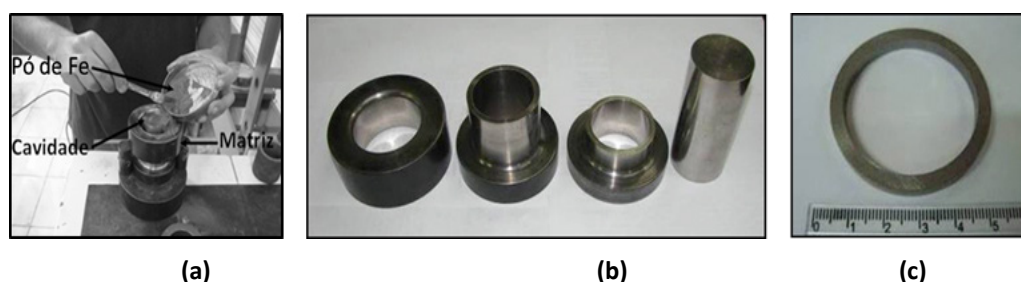


Figura 3 – Amostras na forma de anel, (a) cavidade da matriz, (b) Matriz e (c) Corpo de Prova.

3.3 OBTENÇÕES DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DAS LIGAS

As análises das características magnéticas foram realizadas no Laboratório de Transformação Mecânica (LDTM), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), com o Traçador de Curvas de Histerese Magnética modelo TLMP-TCH-14, de acordo com a norma ASTM A773 (*Standard Test Method for dc Magnetic Properties of Materials Using Ring and Permeameter Procedures with dc Electronic Hysteresisgraphs*).

Para aplicação deste método é necessário preparar as amostras, que consiste na bobinagem (enrolamento de fios de cobre) de espiras primárias e secundárias no anel toroidal (Figura 4). O procedimento consiste em isolar o anel toroidal com filme plástico para evitar descascamento do fio esmaltado, Figura 4 - (a), enrolamento de espiras secundárias, Figura 4 - (b), novo isolamento com filme plástico, Figura 4 - (c) e seguido do enrolamento das espiras primárias, Figura 4 - (d).

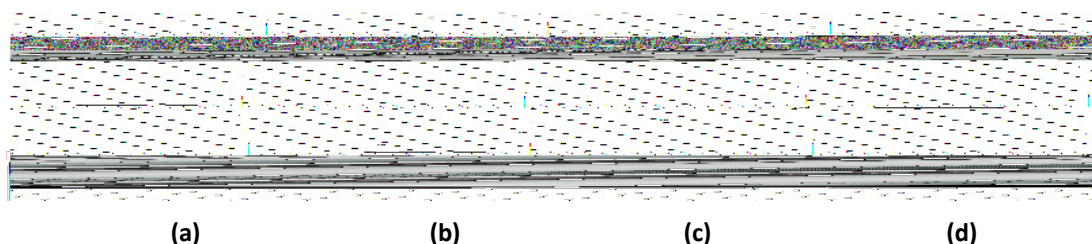


Figura 4 – Etapas de preparação das amostras: (a) isolamento, (b) enrolamento secundário, (c) isolamento e (d) enrolamento do primário.

A resistividade elétrica dos corpos de prova foi obtida a partir do cálculo da resistência elétrica. Para medição de resistência elétrica utiliza-se um multímetro ou multiteste, dispositivo este mede diretamente a resistência elétrica. Entretanto, para medição de resistência elétrica muito baixa, utiliza-se um artifício. Aplica-se uma tensão no corpo de prova e mede-se a corrente elétrica. O inverso, porém é mais prático, ou seja, aplica-se uma corrente e mede-se a tensão. Portanto, o corpo de prova para determinação da resistividade deve ter a forma de barra fina e comprida. Um artifício é a utilização de anel cortando-se um segmento do mesmo, fazendo que este tenha a forma de uma barra curvada, ou seja, de grande comprimento e pequena área de seção transversal. A lei de ohm estabelece que:

$$R = \frac{V}{I} \Rightarrow \rho = R \frac{A}{l} = \frac{V}{I} \cdot \frac{A}{l} \quad [1]$$

Onde **ρ** : Resistividade Elétrica [$\mu\Omega \cdot m$]
R: Resistência Elétrica [Ω]
V: Tensão Elétrica Aplicada [V]
I: Corrente Elétrica Aplicada [A]
A: Área da Seção Transversal da Barra [m^2]
l: Comprimento da Barra (ou segmento de um anel) [m]

A Figura 5 mostra um segmento de um anel com fios de cobre ou terminais soldados para medida da resistividade elétrica.



Figura 5– Anel segmentado com terminais para medida da resistividade elétrica.

4 CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS ESTUDADOS

A Tabela 1 mostra os resultados da resistividade elétrica e das propriedades magnéticas observadas, a partir dos corpos de prova na forma de anel toroidal.

Tabela 1 – Propriedades Elétricas e Magnéticas dos Materiais Simulados (BITTENCOURT, 2012).

Liga	Indução de Saturação (T)	Br (T)	Hc (A/m)	Perdas por Histerese (W/Kg)	Massa específica (g/cm ³)	μ_r	ρ ($\Omega.m$)
Fe puro	1,19	0,9	448,2	$1,60 \times 10^{-02}$	6,632	1852,6	$1,57 \times 10^{-07}$
Fe1%P	1,25	0,96	215,8	$8,46 \times 10^{-03}$	6,712	2766,1	$1,97 \times 10^{-07}$
Fe2%P	1,36	1	207,9	$7,69 \times 10^{-03}$	6,874	4198,7	$3,58 \times 10^{-07}$
Fe3%P	0,98	0,5	210,7	$5,88 \times 10^{-03}$	7,003	919,4	$4,21 \times 10^{-07}$
Fe1%Si	1,03	0,71	246,3	$7,46 \times 10^{-03}$	6,697	1959,8	$2,76 \times 10^{-07}$
Fe3%Si	0,85	0,48	225,4	$5,99 \times 10^{-03}$	6,732	1258,7	$4,44 \times 10^{-07}$
Fe50%Ni	0,93	0,22	112,1	$3,45 \times 10^{-03}$	7,251	945,6	$3,71 \times 10^{-07}$

O Fe50%Ni possui menores coercitividade e perdas por histerese que os demais materiais sinterizados, porém, com menor indução de saturação, propriedade de grande importância à aplicação desses materiais em núcleos de máquinas elétrica. A curva de histerese do Fe puro apresentou características semelhantes ao ferro baixo carbono, material típico utilizado em pacotes de chapas laminadas para construção de núcleos de motores elétricos. O Fe1%P teve maior indução máxima, menor perdas por histerese e coercitividade em relação ao Fe puro.

A resistividade aumentou com a adição de P, Si, e Ni no Fe, devido as distorções no reticulado cristalino (BAS; PUIG; MOLINS, 1988). O Fe puro apresentou resistividade de $1,57 \times 10^{-07} \Omega.m$, contra $4,44 \times 10^{-07}$ da liga Fe3%Si. O Fe3%Si apresentou a maior resistividade, pois o silício, durante o processo de sinterização, não se densifica homogeneamente no ferro e a substituição dos grãos de ferrita pelo Si aumenta a imperfeição na rede cristalina (NARASIMHAM et al., 2008; HANEIJO; PHAN, 1996).

5 PROGRAMA DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL FEMM 4.2

Os resultados das interações eletromagnéticas de uma máquina elétrica rotativa podem ser obtidos através de simulações em programa de elementos finitos FEMM 4.2 (*Finite Element Method Magnetics*). A metodologia de elementos finitos tem como objetivo a solução de equações diferenciais para uma diversidade de entradas. A ideia principal é dividir o material em um grande número de regiões, cada um com uma geometria simples. Em cada elemento a solução é aproximada através de uma interpolação dos valores de cada vértice do triângulo (BORDIGNON et al., 2010).

A vantagem de dividir a área inicial em pequenos elementos é que a partir de uma área conhecida é possível resolver o problema ou sistema de equações mais facilmente. Através do processo de discretização é gerado um sistema de álgebra linear com milhares de variáveis. A solução do sistema ocorre com o auxílio de processadores os quais através de algoritmos, são capazes de resolver o sistema em pouco tempo. A Figura 6 mostra um diagrama esquemático sobre a Metodologia FEMM (BORDIGNON et al., 2010).

As simulações computacionais foram feitas a partir do projeto do motor com os dados fornecidos pelo fabricante (Tabela 2) e as dimensões do motor elétrico representadas na Figura 7. Foram utilizados os parâmetros de bobinamento em série para motor de 12 polos, com 13 espiras enroladas com fio 32AWG, com corrente de 3A e tensão de 12V e ligação em estrela. Os ímãs utilizados no rotor foram de NeFeB, com 40MGOe.

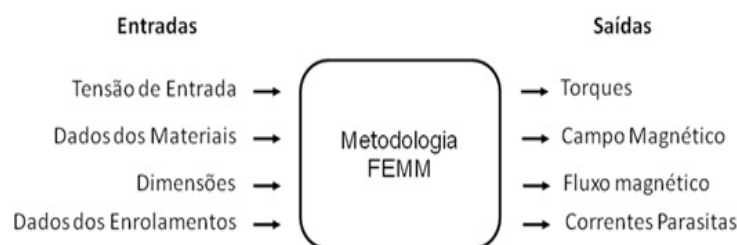


Figura 6 - Metodologia FEMM 4.2 (BORDIGNON et al., 2010).

5.1 CARACTERÍSTICAS DE TORQUE DE UM MOTOR SÍNCRONO DE ÍMÃS PERMANENTES

Para garantir que o motor terá força suficiente para partida até atingir a velocidade nominal, a força de atrito e a própria exigência de carga e o ponto nominal equivalem ao ponto de torque nominal, que é definido pela seguinte expressão (TEIXEIRA, 2006):

$$T \approx p.D.r.l.N.B.I \quad (2)$$

Onde T é o torque (N.m), p é o número de polos (adimensional), D é o diâmetro do rotor (m), r é o comprimento axial do rotor (m), N é o número de espiras (adimensional), B é a densidade de fluxo magnético (T) e I é a corrente do motor (A).

6 SIMULAÇÕES DO MOTOR

Para realizar as simulações foi utilizado um motor síncrono trifásico de corrente contínua como mostra a Figura 7 com suas especificações demonstradas na Tabela 2, sendo que foram empregadas as características do núcleo de chapas e também das curvas de histerese traçadas a partir dos corpos de prova sinterizados de Fe (puro), Fe1%P, Fe2%P, Fe3%P, Fe1%Si, Fe3%Si e Fe50%Ni, demonstradas na tabela 1. O programa empregado foi o FEMM 4.2.

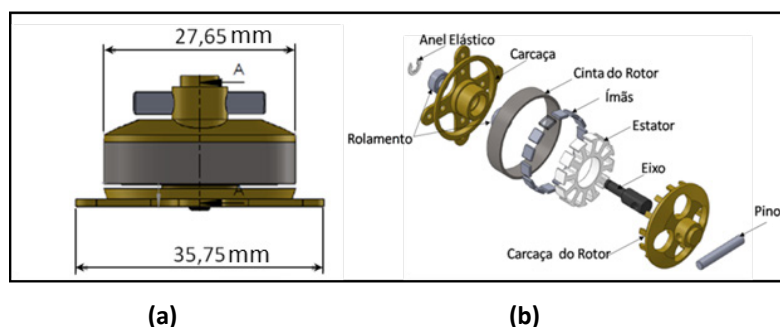


Figura 7 – Motor utilizado – (a) Vista lateral – (b) Vista em perspectiva expandida

Tabela 2 - Característica do Mini Motor Simulado.

Parâmetro	Característica	Unidade
Torque	0,0021	Nm
Polos	12	
Potência	90	W
Tensão	12	V
Corrente nominal	0,3	A
Corrente máxima	7,5	A
Espiras	13	
Diâmetro do rotor	22,5	mm
Comprimento	4	mm
Fio do estator (cobre)	TR32AWG	
Entreferro	0,2	mm
Ímãs de Ne-Fe-B	4x4x1,3	mm
Ligação	Estrela	
Chapas do estator (espessura)	0,4	mm
Rendimento	74	%

6.1 DISTRIBUIÇÕES DO CAMPO MAGNÉTICO E DENSIDADE DE FLUXO NO INTERIOR DO MOTOR COM ESTATOR DE CHAPAS

A Figura 8 demonstra as regiões de distribuição do campo magnético no interior do motor com estator de chapas, observa-se que apenas duas fases do motor estão magnetizadas de acordo com a comutação efetuada durante sua operação.

Torque: 0.00169071Nm.

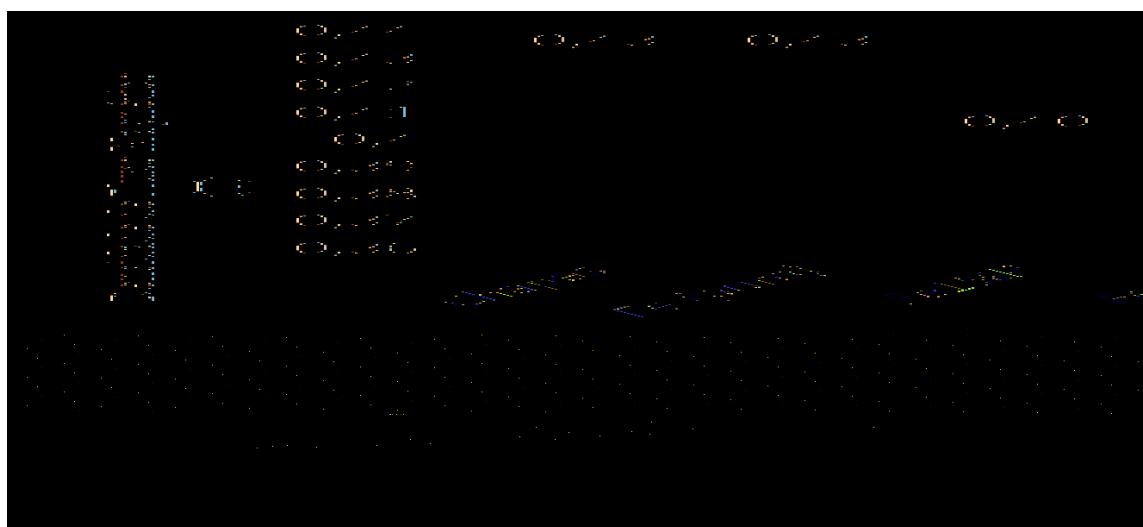


Figura 8 - Regiões de concentração de densidade de fluxo magnético do motor com estator de chapas.

Na figura 9 estão as densidades de fluxo magnético decorrentes das interações entre o estator e o rotor do motor.

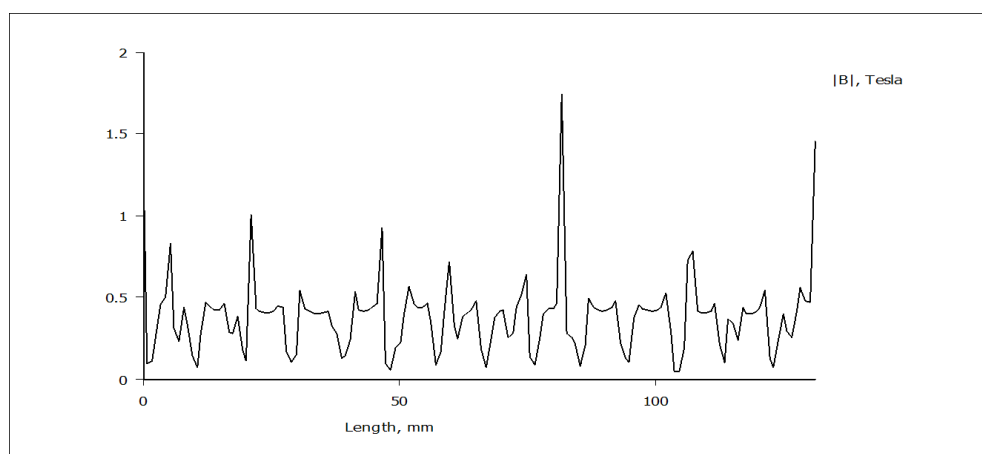


Figura 9 - Densidade de fluxo magnético no entre ferros do Estator de Chapas.

A densidade de fluxo magnético nos entreferros do motor com as ligas estudadas assume um valor próximo a 0,5 T, que é o valor próximo do Ímã de NeFeB utilizado nas simulações.

6.2 Densidades de Fluxo Magnético de Fe (puro), Fe1%P, Fe2%P, Fe3%P, Fe1%Si, Fe3%Si e Fe50%Ni.

A Figura 10 mostra a indução magnética simulada no programa FEMM4.2 no qual foram utilizadas as curvas de magnetização obtidas a partir dos ensaios das propriedades magnéticas obtidas nas curvas de histerese dos materiais de Fe (puro), Fe1%P, Fe2%P, Fe3%P, Fe1%Si, Fe3%Si e Fe50%Ni.

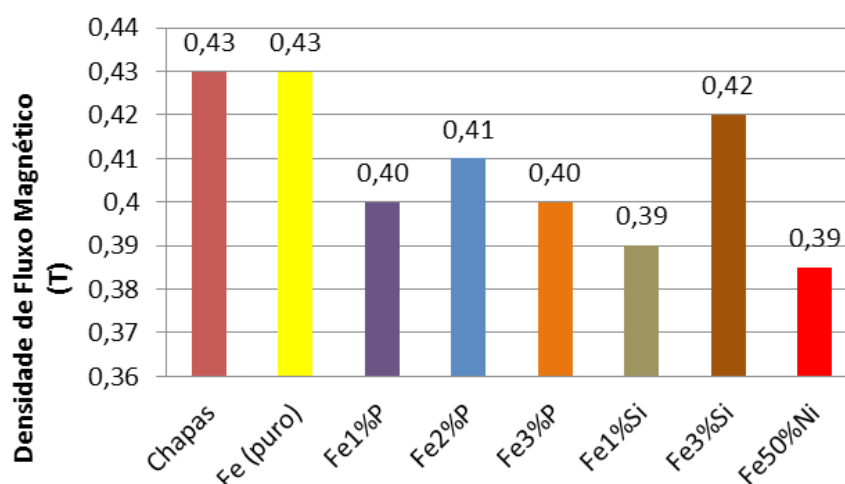


Figura 10 - Densidade de fluxo magnético de Fe (puro), Fe1%P, Fe2%P, Fe3%P, Fe1%Si, Fe3%Si e Fe50%Ni.

A partir dos resultados observados, é possível verificar que o ferro puro sinterizado possui densidade de fluxo magnético próxima à de chapas. De acordo com Nasar (1987) nos motores, o conjugado eletromagnético (torque) desenvolvido é proporcional à densidade de fluxo magnético no entreferro. Portanto, se os núcleos do estator e do rotor são construídos com materiais com maior permeabilidade magnética, o motor poderá apresentar uma melhor desempenho.

6.3 TORQUES DE FE (PURO), FE1%P, FE2%P, FE3%P, FE1%SI, FE3%SI E FE50%NI.

A Figura 11 mostra os torques simulados no programa FEMM4.2 para os materiais de Fe (puro), Fe1%P, Fe2%P, Fe3%P, Fe1%Si, Fe3%Si e Fe50%Ni.

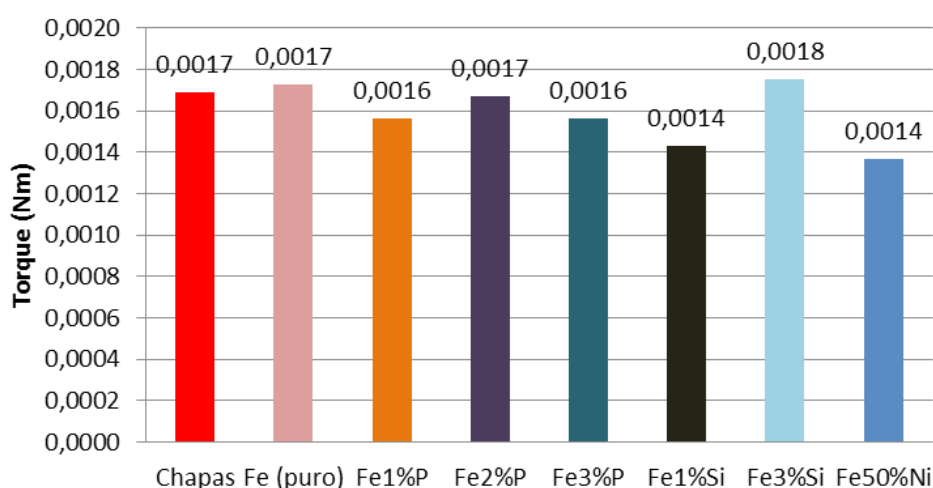


Figura 11 - Torque de Fe (puro), Fe1%P, Fe2%P, Fe3%P, Fe1%Si, Fe3%Si e Fe50%Ni.

Nas simulações comparativas observa-se que os torques simulados no programa FEMM 4.2 possuem valores próximos aos de projeto original do mini motor e Fe3%Si apresentou maior torque, seguido de Fe puro e FeP, no entanto Fe puro obteve melhor densidade de fluxo magnético.

7 CONCLUSÕES

O programa de elementos finitos FEMM4.2 é uma ferramenta importante para a análise do comportamento eletromecânico de máquinas elétricas, pois possibilita a simulação de seu funcionamento, diminuindo assim a construção e testes de protótipos.

Os torques simulados das ligas estudadas possuem valores próximos ao de projeto do motor com estator de chapas mostrado na Tabela 2, possibilitando a substituição dos núcleos convencionais por núcleos sinterizados produzidos por processos de metalurgia do pó.

Todas as ligas estudadas apresentaram propriedades magnéticas compatíveis para a construção de um motor elétrico, no entanto os núcleos convencionais de chapas apresentam fluxo magnético em duas direções, pois as finas camadas laminadas isoladas entre si propiciam a este fato, contudo a fabricação de um estator com núcleo sinterizado em um bloco único possui fluxo magnético em três direções, podendo apresentar características de funcionamento diferentes. Apesar dos resultados preliminares serem satisfatórios, somente com a construção do motor com núcleo sinterizado em bloco único se obterá os dados conclusivos de sua operabilidade.

REFERÊNCIAS

- BAS, J. A.; PUIG, J.; MOLINS, C. B. **Soft Magnetic Materials in P/M: Current Applications and State-of-the-Art**, Modern Developments in Powder Metallurgy, Princeton, New Jersey, Metal Powder Industries Federation, v.18, 1988, p. 745 - 756.
- BITTENCOURT, S. D. **Caracterização de Ligas Magnéticas Sinterizadas para Aplicação em Núcleos de Máquinas Elétricas Rotativas**. Dissertação de Mestrado, UFRGS, 2012, 90 p.
- BORDIGNON, W. C. et al. **Simulação em Software de Elementos Finitos de Máquinas Elétricas Rotativas com Núcleos Sintetizados a partir da liga Fe-Si**, 30º SENAFOR, 7º Encontro de Metalurgia do Pó, 1ª Conferência Internacional de Metalurgia do Pó, ANAIS, 1ª Ed., Ed. Lirio Schaeffer; Alexandre da Silva Rocha, 2010, p. 271 - 287.
- DEL TORO, V. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. Ed. Livros Técnico Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 1994. 550p.
- FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY C. JR.; UMANS, S.D. **Electric Machinery**. 6ªed., McGraw-Hill Inc, New York, 2003. 599p.
- GERMAN, R. M. **Powder Metallurgy Science**, Metal Powder Industries Federation, New Jersey, USA, 1984, 279 p.
- HANEIJO, F. G.; PHAN, H. G. **Powder metallurgy materials for AC magnetic applications**. Washington, D. C.: Presented at PM TEC, 96 World Congress, June 16-21, 1996.
- JAHNS, T. et al. **Permanent Magnet Machines and Drives: Principles, Design and Applications**, Course, Department of Engineering Professional Development, University of Wisconsin-Madison, 2009.
- JAMES, B. A.; WILLIAMS, G. **Review of the Magnetic Properties of Sintered Iron**. Powder Metallurgy, v.22, n.2, 1979. p.75-85.

JANSSON, P. **Soft Magnetic Materials for A.C. Applications**. Höganäs A.B., HoeganesSwed, Powder Metallurgy, v.35, n.1, 1992.p.63-66.

JILES, D. **Introduction to Magnetism and Magnetic Materials**. London, Chapman and Hall, 1991. 440p.

KRAUS, J. D.; CARVER, K.R. **Eletromagnetismo**. R. Janeiro, Guanabara, 1978. 780 p.

KRAUSE, R. F.; BULARZIK, J. H.; KOKAL, H. R. **New Soft Magnetic Material for AC and DC Motor Applications** *Magnetics Inc, Burns Harbor*, IN, USA., Journal of Materials Engineering and Performance, v.6, n.6, Dec. 1997. p.710-712.

LALL, C. **Soft Magnetism, Fundamentals of Powder Metallurgy and Metal Injection Molding**, Princeton, New Jersey. Metal Powder Industries Federation, 1992. 139 p.

LALL, C.; BAUM L. W. **High Performance Soft Magnetic Components by Powder Metallurgy and Metal Injection Molding**. Modern Developments in P/M, v.18, 1998. p.363-389.

LANDGRAF, F. J. G.; PLAUT, R. L. **Efeito do Tamanho de Grão na Permeabilidade Magnética Máxima da Liga Ferro 47,5% Níquel**, Metalurgia. ABM, v.45, n.380, 1989. p. 677-681.

LUBORSKY, F. E.; LIVINGSTON, J. D.; CHIN, G. Y. **Magnetic Properties of Metals and Alloys**. Physical Metallurgy. Amsterdam: Elsevier Science, 1996.

LENEL, F. V. **Magnetic Applications**. Metals Hadbook, v.7, 1984, p.638-641.

MORO, N.; AURAS, A. P. **Metalurgia do Pó e o futuro da indústria**. Florianópolis: Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, Curso Técnico de Mecânica Industrial, 2007. 28 p.

MOYER, K. H. **The Effect of Proposity on the Properties of Iron Compacts**. Riverton, N. J. Hoeganes Corporation, 1980.

NARASIMHAM, K.; HANEJKO, F.; MARUCCI, L. **Growth Opportunities with Soft Magnetic Materials**. Washington, D. C.: Höganäs Corporation, 2008. 9 p.

NASAR, S. A. **Handbook of Electric Machines**. New York, McGraw-Hill, 1987, 217p.

NORMA ASTM A773 (**Standard Test Method for dc Magnetic Properties of Materials Using Ring and Permeameter Procedures with dc Electronic Hysteresigraphs**), 2009.

SMITH. W. F. **Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 3ª ed., Ed. McGRAW-HILL, 1998.

SIQUEIRA, D. S.; ANDRADE, D. A. **Projeto e Simulação de Um Motor de Corrente Contínua sem Escovas**, XII Seminário de Iniciação Científica, 2008, 10f.

TEIXEIRA, F. H. P. **Metodologia para Projeto, Construção e Ensaios em Máquinas Síncrona a Ímã Permanente – MSIP**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos – USP, 2006. 142p.

YEDAMALE, P. **Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals**, Microchip AN885, 2003.